전력용 변압기의 온도상승 예측을 위한 전자계-열계 결합해석기법 연구

논 문
60-10-7

A Study of Coupled Electromagnetic-Thermal Field Analysis for Temperature Rise Prediction of Power Transformer

안 현 모* · 김 민 수** · 송 재 성*** · 한 성 진†
(Hyun-Mo Ahn · Min-Soo Kim · Jae-Sung Song · Sung-Chin Hahn)

Abstract - This paper deals with coupled electromagnetic-thermal field analysis for thermal fluid analysis of oil immersed power transformer. Electric power losses are calculated from electromagnetic field analysis and are used as input source of thermal field analysis based on computational fluid dynamics(CFD). Particularly, In order to accurately predict the temperature rise in oil immersed power transformer, the thermal problem should be coupled with the electromagnetic problem. Moreover, to reduce analysis region, the heat transfer coefficient is applied to boundary surface of the power transformer model. The coupling method results are compared with the experimental values for verifying the validity of the analysis. The predicted temperature rises show good agreements with the experimental values.

Key Words : Computational Fluid Dynamics(CFD), Coupled analysis, Power transformer, Temperature rise

1. 서 론

최근 국부적인 전력 급증 문제를 해결하기 위해 송배전 분야에서는 친환경 녹색 성장과 전력 IT산업을 결합한 전력 계통의 스마트 그리드(Smart Grid) 화가 진행 중이다. 스마트 그리드 전력망의 공급신뢰도와 효율 향상을 위해 전력기기의 고효율화 및 대용량화가 이루어지고 있지만, 대용량화는 전력기기의 크기를 키우게 되어 도시 공간의 효율적인 활용에 제한이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전력기기의 대용량화를 진행하면서 소형화와 경량화 기술 개발이 이루어져야 할 것이다.

전력용 변압기의 소형화와 경량화는 같은 용량에서 크기가 작아지면 단위 체적 당 열 발생률이 증가하여 온도상승을 유발한다. 온도상승의 범위를 규격(Standard)에서 제한하는 일정한 한도로 유지하기 위해 냉각작용이 매우 중요시해진다. 유입식 변압기의 냉각작용은 주로 대류에 의해 발생하는 열전달로 이루어지며, 만약 냉각작용이 불충분하여 온도상승이 제한범위를 초과하게 되면 절연물의 급속한 열화가 진행되면서 이상 전압 또는 외부 단락 등이 발생하여 전기적, 기계적 스트레스에 의해 전력용 변압기의 수명단축이 일어난다. 이처럼, 전력용 변압기의 수명은 열적 특성에 큰 영향을 받으므로 변압기 내부의 온도상승 및 Hot-Spot 온

도를 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다[1, 2].

전력기기의 열 해석법은 두 영역의 열에너지 이동을 이용한 열해석법(Heat Transfer Analysis)과 유체역학적인 열해석법(Thermal Fluid Analysis)으로 나뉘어진다. 열전달 해석법은 전도(Conduction)와 대류(Convection) 그리고 복사(Radiation)에 의한 지배 방정식을 풀어 해석하며, 해석의 신뢰성은 떨어지지만, 해석시간을 단축할 수 있는 이점을 가지고 있다. 반면, 열유동 해석법은 유체역학(Fluid Dynamic)의 지배방정식인 연속방정식(Continuity Equation)과 운동방정식(Equations of Motion) 그리고 에너지평형방정식(Energy Balance Equation)과 열전달해석을 동시에 고려하여 해석하며, 해석시간은 오래 걸리지만 해석의 신뢰성이 높다는 이점을 가지고 있다[3-5].

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도상승을 예측하기 위해 전자계-열계 결합해석기법을 이용한 열유동 해석을 수행하였다. 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실은 1차, 2차 권선에 정격전류가 흐를 때 권선에서 발생하는 부하손실인 동손과 무부하시 철심에서 발생하는 철손을 고려하였으며, 이들은 전자계 해석(Electromagnetic Analysis)을 통해 계산하였다. 이때, 권선의 저항값은 온도변화에 따라 크기가 달라지므로 결합해석 기법으로 증가하는 전력손실을 고려하였다. 전자계해석으로 얻어진 전력손실은 열유동해석의 열원으로 적용하여 전력용 변압기의 온도상승을 예측하였다. 외부공기와 변압기의 경계면에 대류 열전달계수를 적용함으로써 해석영역의 축소에 따른 해석시간의 단축과 해의 수렴성을 증가시켰다. 전자계-열계 결합해석기법을 이용해 예측된 전력용 변압기의 온도분포는 온도상승 시험을 통해 얻어진 측정값과 비교해 해석기법의 타당성을 검증한다.

* 정 회 원 : 동아대 공대 전기공학과 박사과정
** 비 회 원 : 한국전기연구원 재료응용연구본부 선임연구원
*** 비 회 원 : 한국전기연구원 재료응용연구본부 책임연구원
† 교신저자, 시니어회원 : 동아대 전기공학과 교수

E-mail : schahn@dau.ac.kr
접수일자 : 2011년 8월 3일
최종완료 : 2011년 9월 17일

2. 본 론

2.1 전자계 해석

2.1.1 지배방정식

온도상승의 원인이 되는 열원을 계산하기 위해 권선과 철심에서의 전력손실밀도를 먼저 계산해야 한다. 식(1)은 전자계 지배방정식을 나타내고 있으며, 이는 정상교류전류가 권선에 흐를 때 발생하는 자기 벡터 포텐셜과 자계가 시간에 따라 변화할 때 자계의 반대방향으로 발생하는 와전류를 고려하고 있다. 즉, 전자계 지배방정식을 이용해 권선과 철심에서 발생하는 와전류와 철심 내에 분포된 자속밀도를 계산한다. 식(1)의 우변은 전원 전류밀도와 와전류 밀도의 합이며, 전원 전류와 와전류가 고려된 총 전류는 식(2)를 통해 계산할 수 있다[6, 7].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_m} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$I = \int_s \vec{J} ds \quad (2)$$

여기서, μ_m 는 투자율[H/m], σ_e 는 도전율[S/m], $\vec{A}$ 는 자기 벡터 포텐셜, $\vec{J}_s$ 는 전원 전류밀도[A/m²], $\vec{J}_e$ 는 와전류 밀도[A/m²], 총 전류 밀도 $\vec{J}$ [A/m²]는 $\vec{J}_s + \vec{J}_e$ 이다.

2.1.2 전력손실

전력용 변압기에서 발생하는 전력손실은 크게 부하손실과 무부하손실로 나눈다. 부하손실에는 동손과 표유부하손이 있으며, 무부하손실에는 무부하 시 발생하는 동손과 철손이 있다. 변압기 권선에서 발생하는 전력손실은 변압기 온도상승에 가장 큰 열원으로 적용되고 있으며, 전력손실의 크기는 권선에 흐르는 전류와 저항값을 고려한 식(3)을 통해 계산된다. 변압기 철심에서 발생하는 전력손실은 Steinmetz 실험식의 오차를 줄일 수 있는 Bertotti 모델[8]을 통해 계산한다. 이때, 손실에 관련된 계수는 철심의 비선형적인 특성을 나타낸 철손데이터를 통해 얻을 수 있다[9, 10].

$$P_w = I^2 R \quad (3)$$

$$P_c = \{K_h f B_m^2 + K_e (f B_m)^2 + K_c (f B_m)^{1.5}\} w \quad (4)$$

여기서, P_w 는 권선의 손실[W], I 는 권선에 흐르는 전류[A], R 은 권선의 저항[Ω], P_c 는 철심의 손실[W], B_m 은 최대자속밀도[T], K_h 는 히스테리시스손실(Hysteresis Loss) 계수, K_e 는 와전류손실(Eddy Current Loss) 계수, K_c 는 초과손실(Excess Loss) 계수, w 는 철심의 중량[kg]이다.

2.2 열계 해석

2.2.1 열전달 방정식

열전달은 고온에서 저온으로 열의 흐름이 발생하는 것을 말하며, 이러한 열전달에는 전도, 대류, 복사의 세 가지 방식이 있다. 전도는 입자 간의 상호작용에 의해서 에너지가 많은 입자에서 에너지가 적은 입자로 에너지가 전달되는 것을 말하며, 물체의 기하학적 형상, 두께, 재질 그리고 물체를 통한 온도 차에 따라 다르게 나타난다. 이는 푸리에의 열전도 법칙에 의해 정상상태 열전도 방정식인 식(5)와 같이 나타낼 수 있다[11].

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \nabla T \quad (5)$$

여기서, $\dot{Q}_{cond}$ 는 전도에 의한 열전달률[W], k 는 열전도율[W/m·K], T 는 온도[°C], A 는 면적[m²]이다. 대류는 고체 면과 유동하는 인접한 액체 또는 기체 사이에서 발생하는 열전달이며, 이는 유체 내의 온도 차에 따라 발생한 밀도 변화로 일어나는 열전달인 자연대류와 펌프나 송풍기를 이용해 인위적인 유체유동을 일으켜 발생하는 열전달인 강제대류가 있다. 대류의 열전달률은 단순히 온도 차에 비례하여 나타나며, 뉴턴의 냉각 법칙에 의해 식(6)으로 표현한다[11].

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (6)$$

여기서, $\dot{Q}_{conv}$ 는 대류에 의한 열전달률[W], h 는 대류 열전달 계수[W/m²·°C], A_s 는 대류 열전달이 발생하는 면적[m²], T_s 는 물체 표면 온도[°C], T_∞ 는 외부 온도[°C]이다. 복사는 물질이 원자나 분자의 구조가 변하면서 전자파 또는 광자의 형태로 방출되는 에너지이며, 전도나 대류와는 달리 복사 열전달에서 중간 매개체가 필요 없이 발생한다. 복사 열전달률은 스테판 볼츠만 법칙에 의해 식(7)과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

여기서, $\dot{Q}_{rad}$ 는 복사에 의한 열전달률[W], ϵ 는 표면의 방사율, σ 는 스테판 볼츠만 상수[W/m²·K⁴]이다.

2.2.2 대류 열전달 계수

대류 열전달계수는 고체 표면과 유체 사이에 단위 표면적당, 단위 온도 차에 대한 열전달률로 정의되며 일반적으로 대류 열전달계수는 유체의 흐름 방향에 따라 변화한다. 이 같은 경우에 전체 표면에 대한 국소 대류 열전달계수를 평균하여 얻을 수 있으며, 전체 변수의 수를 줄이기 위해 무차원수인 누셀트 수(Nusselt Number)를 이용해 대류 열전달 계수를 얻을 수 있다. 누셀트 수는 유체의 속도, 유체의 물성값, 물체의 형상 등에 의해 결정되며, 수직평판에 자연대류를 고려한 평균 누셀트 수는 식 (8)과 같고, 수평평판에

자연대류를 고려한 평균 누셀트 수는 다음 식 (9)와 같이 표현한다. 또한, 대류 열전달계수는 누셀트 수를 이용한 식 (10)을 이용해 얻을 수 있다[11, 12].

$$Nu_v = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (8)$$

$$Nu_h = 0.27 Ra^{1/4} \quad (9)$$

$$h = \frac{k}{\delta} Nu \quad (10)$$

여기서, Nu_p 는 수직평판에 대한 누셀트 수, Nu_h 는 수평평판에 대한 누셀트 수, Ra 는 레이리 수, Pr 은 프란틀 수, δ 는 특성길이[m]이다.

2.2.3 열전달 메커니즘

배전용 변압기의 내부는 열적 스트레스를 일으키는 권선과 철심이 냉각오일과 외함에 밀폐된 상태이며, 변압기의 열전달은 복사와 자연대류에 의해 일어난다. 변압기의 열전달 메커니즘은 그림 1과 같다.

그림 1 변압기 열전달 메커니즘

Fig. 1 Heat transfer mechanism of a transformer

변압기 권선에 정격전류가 흐를 때 발생하는 철심과 코일의 전력손실(Q_{gen})은 복사(q_{1rad})와 자연대류(q_{1conv})에 의해 방열판 및 외부탱크로 열전달이 이루어진다. 주 손실원으로 부터 전달된 열전달($q_{1rad} + q_{1conv}$)은 외부로의 복사(q_{2rad})와 자연대류(q_{2conv})에 의해 전달된다. 이는 시스템으로 들어가는 총에너지와 시스템에서 나오는 총 에너지가 같다는 에너지 보존법칙에 바탕을 두고 있으며, 열 또는 열에너지가 같은 온도차에 의해 전달되는 에너지의 형태로 열평형이 나타나고 이를 식(11)에 나타내었다[11].

$$Q_{in} - Q_{out} + E_{gen} = \Delta E_{thermal\ system} \quad (11)$$

이러한 에너지 보존법칙에 따라 권선과 절연유, 철심과 절연유 간의 에너지 평형방정식을 식(12), (13)과 같이 세울 수 있다. 식(12), (13)의 우변 첫 번째 항은 권선과 철심에

저장된 에너지를 나타내고 있고, 두 번째 항은 권선과 절연유, 철심과 절연유 간의 대류 열전달을 표현하고 있으며, 세 번째 항은 복사 열전달을 나타내고 있다. 즉, 발생한 총 열 에너지는 권선과 철심 속에 저장된 열에너지와 절연유로 전달된 열에너지의 합과 같다는 관계를 보여주고 있다[13].

$$Q_{winding} = (mC_p)_w \frac{dT_w}{dt} + h_w A_w (T_w - T_{oil}) + (\epsilon\sigma)_w A_w (T_w^4 - T_{oil}^4) \quad (12)$$

$$Q_{core} = (mC_p)_c \frac{dT_c}{dt} + h_c A_c (T_c - T_{oil}) + (\epsilon\sigma)_c A_c (T_c^4 - T_{oil}^4) \quad (13)$$

여기서, $Q_{winding}$ 은 권선에서 발생하는 열에너지[W], Q_{core} 는 철심에서 열에너지[W], m 은 질량[kg], C_p 는 일정 압력에서의 비열[J/kg·°C], T_w 는 권선의 표면온도[°C], T_c 는 철심의 표면온도[°C], T_{oil} 는 절연유의 온도[°C], h_w 는 권선의 대류 열전달계수[W/m²·°C], h_c 는 철심의 대류 열전달계수[W/m²·°C], A_w 는 권선의 단면적[m²], A_c 는 철심의 단면적[m²]이다.

2.3 유동계 해석

2.3.1 지배방정식

유체 중에 온도 차가 존재하면 열의 이동이나 흐름이 생긴다. 이때의 열은 일반적으로 전도, 대류, 복사의 방식 중 하나 또는 둘 이상의 방식으로 전달되며, 변압기 내부에서의 열은 대부분 냉각 오일의 순환에 의한 대류가 가장 큰 비중을 차지한다. 냉각 오일의 동특성은 열-유동 해석을 통해 예측할 수 있으며, 변압기 내부에서 발생하는 열전달 현상에 의해 변압기의 정확한 온도분포를 예측할 수 있다[5]. 변압기의 내부 유동현상 및 온도 분포를 파악하기 위한 유체역학 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식, 에너지 평형 방정식으로 구성된 3가지 종류의 편미분 방정식을 동시에 풀어야 한다. 특히, 자연대류에서는 에너지 방정식과 Navier-Stokes방정식 및 연속방정식을 결합하는 것이 중요하다. 정상 압축성 유동일 때 모든 유체성질은 시간에 무관하여 위치의 함수가 되므로 연속방정식은 식(14)과 같이 표현할 수 있으며, 일정한 밀도와 일정한 점성계수를 갖는 Newton 유체에 대한 운동방정식인 Navier-Stokes방정식은 식(15)과 같고, 비압축성 점성에 적용되는 에너지방정식은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다[14-16].

$$\nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (14)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (15)$$

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = \nabla^2 (kT) + \mu \Phi + Q \quad (16)$$

여기서, ρ 는 밀도[kg/m³], $\vec{v}$ 는 유체속도[m/s], $\vec{g}$ 는 중력

가속도[m/s²], p 는 압력[N/m²], μ 는 점성계수[kg/m·s], Q 는 단위 체적당 외부에서 공급되는 열량[W/m³], 그리고 ϕ 는 산일 에너지이다.

2.4 결합해석

2.4.1 전자계-열계 결합해석

복합적으로 발생하는 물리적 현상을 다루기 위해 두 가지 또는 세 가지의 물리적 현상을 결합하여 그 현상의 특성을 파악하는 해석기법으로 변압기 내에서 일어나는 전자기적인 현상과 열적인 현상, 그리고 기계적인 현상을 모두 고려하기 위해서는 결합해석기법을 적용해야 한다. 전자계 영역에서 물질의 특성데이터는 온도에 의해 영향을 받아 열해석의 결과에 영향을 준다. 전자기적인 특성 중에 온도에 영향을 받는 전기저항률과 전기전도율은 식(17)과 식(18)을 이용해 온도변화에 따른 데이터를 재계산되어야 하며, 재계산된 전기저항률을 이용해 식(19)과 같이 온도에 따른 저항값을 계산할 수 있다[17]. 저항값은 식(3)에서 볼 수 있듯이 전력손실에 관계되는 함수이므로 저항값의 변화는 온도상승의 원인이 되는 열원의 크기를 변화시키게 된다. 또한, 온도에 따른 전기전도율의 변화는 식(1)에 나타나 있는 와전류 항에 영향을 주므로 전자계 지배방정식도 온도에 영향을 받게 된다.

$$\rho_e(T) = \rho_{e,0} [1 + \alpha_c (T - T_0)] \quad (17)$$

$$\sigma_e(T) = \frac{1}{\rho_e(T)} = \frac{\sigma_{e,0}}{1 + \alpha_c (T - T_0)} \quad (18)$$

$$R(T) = \frac{\rho_e(T)\ell}{A_c} \quad (19)$$

여기서, ρ_e 는 전기저항률[Ω·m], $\rho_{e,0}$ 는 기준온도에서의 전기저항률[Ω·m], α_c 는 도체의 온도계수[1/°C], T_0 는 기준온도[°C], σ_e 는 전기도전율[S/m], $\sigma_{e,0}$ 는 기준온도에서의 전기도전율[S/m], A_c 는 도체의 단면적[mm²]이다. 이러한 관계들을 고려해 전자계-열계 결합해석이 이루어지게 되면 해석의 정확도를 향상할 수 있다. 전자계-열계 결합해석의 흐름은 그림 2에 나타내었다.

그림 2 전자계-열계 결합해석 흐름도

Fig. 2 Flow chart of coupled electromagnetic-thermal field analysis

먼저, 초기온도를 이용해 전자계 해석을 하여 전력손실을 계산하고, 계산된 전력손실을 열원으로 이용해 온도를 계산한다. 이렇게 얻어진 온도를 이용해 물질의 데이터를 재계산하여 해석을 반복해서 수행한다. 이러한 과정은 물질의 데이터가 변화가 없을 때까지 반복해서 수행한다.

2.5 전자계-열계-유동계 결합해석 모델

변압기는 매우 복잡한 구조로 되어 있어 모델링하기가 어려우며, 정밀한 모델링을 한다고 해도 해를 수렴시키는 과정에서 어려움이 발생한다. 전자계해석은 해석에 크게 영향을 미치는 철심과 권선 부분을 고려해 그림 3(a)와 같이 모델링 하였다. 하지만 열유동해석은 전자계해석과는 달리 구조물의 영향을 많이 받기 때문에 정확한 모델링을 하지 않으면 결과 값에 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서 열유동해석에 영향을 미치는 여러 구조물과 권선을 고려해 그림 3(b)와 같이 모델링하였다. 또한, 해석의 정확도를 향상하기 위해 3차원으로 형상을 모델링 하였다. 본 논문에서 다룬 결합해석 모델은 단상 외철형 1MVA급 유입식 변압기로 사양은 표 1에 나타내었다.

(a) 전자계해석 모델

(b) 열유동해석 모델

그림 3 결합해석 모델

Fig. 3 Coupled analysis model

표 1 해석모델 사양

Table 1 Specifications of the analysis model

구 분	사 양
정 격 용 량	1 [MVA]
정 격 전 압	6600/690[V]
주 파 수	60 [Hz]
냉 각 매 질	Mineral Oil

2.6 해석결과

2.6.1 전자계 해석

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실을 계산하기 위해 3차원 전자계해석을 수행하였다. 유한요소법에 의한 전자계해석을 위하여 해석 모델의 전처리 과정에서 정확한 격자생성이 선행되어야 하며, 그림 4는 전자계 해석에 적용되는 권선과 철심 모델의 격자생성을 나타내고 있다.

그림 4 격자생성모델 (전자계 해석)

Fig. 4 Finite element meshes

철심의 자속밀도 분포를 해석하기 위해 무부하 조건에서 권선에 여자전류를 흘려 전자계 해석을 수행하였다. 이때, 변압기 철심의 자속밀도 분포를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보듯이 변압기 철심은 포화하지 않는 상태에서 운전하는 것을 확인할 수 있다. 철심이 가지는 전력손실을 계산하기 위해 철손데이터를 Bertotti 모델을 이용해 그림 6과 같이 모의하였다. Bertotti 모델의 초과손실(Excess Loss)은 Steinmetz 방정식에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 사용한다.

그림 5 자속밀도분포

Fig. 5 Flux density distribution

그림 6 철손데이터 (60Hz)

Fig. 6 Core loss data at 60Hz

변압기 해석모델의 정격전류와 자속밀도 분포로부터 변압기 내부의 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실을 식(3), (4)를 이용해 권선과 철심에서 각각 계산하였다. 전자계 해석을 이용해 얻은 해석모델의 전력손실밀도는 표 2에 나타내었다. 계산된 전력손실밀도는 그림 2에서 제시한 방법을 통해 온도변화를 고려한 열원으로 보정하여 사용한다.

표 2 전력손실밀도

Table 2 Power loss density

구 분	전력손실밀도[W/m ³]
저압권선(LV)	188305.7
고압권선(HV)	163020.6
철 심	10335.3

2.6.2 열유동 해석

전자계 해석을 이용해 온도상승의 원인이 되는 전력손실을 계산하였고, 계산된 전력손실을 열유동해석의 열원으로 적용해 해석모델의 온도상승을 예측하고자 한다. 열유동 해석법은 해석의 정확성이 높지만, 계산시간이 많이 필요한 단점을 가지고 있다. 이에 최외각 경계면에 대류 열전달계수를 적용함으로써 해석영역을 축소하여 해석시간을 단축했다. 또한, 유한체적법(Finite Volume Method)에 의한 열유동 해석 수행 시 해의 수렴을 향상하기 위해 해석 모델의 전처리 과정에서 정렬격자(Hexahedron)로 격자를 생성하였다. 그림 7은 열유동 해석에 적용되는 변압기 모델의 격자생성을 나타내고 있으며, 전자계-열계 결합해석기법의 타당성을 검증하기 위해 결합해석기법이 적용되지 않은 모델과 적용된 모델을 해석하여 시험을 통해 얻은 데이터와 비교하고자 한다.

그림 7 격자생성모델 (열유동 해석)

Fig. 7 Computational fluid dynamic meshes

본 논문에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 상용 프로세서인 Fluent를 이용해 열유동 해석을 하였다. 기존해석모델은 전도와 자연대류 및 복사에 의한 열전달을 고려하였고, 기존해석모델에 본 논문에서 제안한 전자계-열계 결합해석기법을 추가로 적용한 결합해석모델을 해석하였다. 그림 8은 기존해석모델과 결합해석모델의 온도분포를 나타내고 있으며, 두 가지 해석모델의 Hot-Spot은 저압권선의 상부에서 발생하였다. 기존해석모델의 Hot-Spot 온도는 약 110.3°C로 환경온도를 고려하였을 때 약 83.4°C의 온도가 상승하였고, 결합해석모델의 Hot-Spot 온도는 약 128.3°C이며,

환경온도를 고려하였을 때 약 101.4°C의 온도가 상승하였다. 결합해석모델은 기존해석모델의 Hot-spot 온도보다 약 18°C가 증가한 결과를 얻었다.

(a) 기존해석모델

(b) 결합해석 모델

그림 8 해석모델의 온도분포

Fig. 8 Temperature distribution of analysis models

해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 온도상승 시험을 통해 얻은 측정값과 비교 분석하였다. 시험모델의 온도는 센서를 사용해 측정하였고 각 온도센서의 부착위치는 그림 9에 나타내었다.

그림 9 온도측정 센서위치

Fig. 9 Sensor location

기존해석모델과 결합해석기법을 적용한 해석모델의 해석 결과 및 시험을 통해 얻어진 데이터를 표 3에 나타내었다. 기존의 해석기법과 결합해석기법을 이용해 예측된 저압권선과 고압권선 및 방열판에서 온도상승을 센서를 통해 얻어진 측정값과 비교 검토하기 위해 위치에 따른 온도상승을 그림 10에 나타내었다. 변압기에서 발생한 온도상승은 결합해석모델이 측정값과 비교했을 때 저압권선에서 약 6.7%, 고압

권선에서 약 8.7%, 외부 방열판에서 약 6.1%의 평균오차가 발생하여 기존해석모델보다 더 근사한 결과를 얻어 전자계-열계 결합해석기법의 타당성을 검증하였다.

표 3 온도상승 데이터

Table 3 Temperature rise data of sensor location

구 분	LV1	LV2	LV3	LV4	HV1	HV2	RA1	RA2
기존해석 [°C]	75.5	83.4	57.4	71.8	57.9	53.2	29.2	24.1
결합해석 [°C]	92	101	68.5	86.9	70.4	66	39.3	28
측정값 [°C]	87.7	-	64.2	78.9	63.5	61	40.9	25.7

(a) 저압권선

(b) 고압권선

(c) 방열판

그림 10 측정위치에 따른 온도상승 비교

Fig. 10 Temperature rise comparison at measured location

3. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도 상승 예측의 정확도를 향상하기 위한 전자계-열계 결합해석기법을 제안하였다.

해석모델의 온도상승을 예측하기 위해 온도상승의 원인이 되는 전력손실을 계산하기 위해 전자계 해석을 이용하였다. 온도변화에 따른 권선의 전력손실 변화는 결합해석기법을 이용해 계산하였으며, Bertotti 모델을 이용해 철심에서의 전력손실을 계산하였다. 전자계해석을 통해 얻어진 전력손실을 열계해석의 소스원으로 적용하여 열유동해석을 수행하였다. 해석시간 단축을 위해 대류 열전달계수를 경계조건으로 적용해 해석영역을 축소하였으며, 해석모델의 격자 형태를 정렬격자로 구성하여 해의 수렴성을 향상하였다. 제안된 결합해석기법의 타당성을 검증하기 위해 실제 시험용 변압기를 제작하여 온도상승 시험을 수행하였다. 온도상승 시험을 통한 측정값과 결합해석기법에 의한 예측값을 비교한 결과 저압권선에서 약 6.7%, 고압권선에서 약 8.7%, 방열판에서 약 6.1%의 평균오차가 발생하여 본 논문에서 제시한 전자계-열계 결합해석기법의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 다른 결합해석기법을 이용한 전력용 변압기의 온도상승 예측기법을 초고압 전력용 변압기 설계에 적용할 수 있을 것을 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 20114030200030)과 한국전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본연구사업으로 수행한 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Zhanq Tao, Cai Jin-ding, "Study on Life Prediction Method of Oil Immersed Power Transformer", *Electric Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 486-489, Oct. 2008.
- [2] Martin J. Heathcote, "The J&P Transformer Book", Elsevier, Inc, 2007.
- [3] 안현모, 오연호, 한성진, "전자계-열계 결합해석에 의한 전력용 변압기의 열전달 해석", *대한전기학회지*, Vol. 58, No.11, pp.2155-2161, Nov. 2009.
- [4] 이형직, "유한요소법에 의한 유체역학·열전도 해석 입문", Perason Education Korea, 2000.
- [5] John C. Tannehill, Dale A Anderson, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", Taylor & Francis, 1997.
- [6] Matthew N. O. Sadiku, "Elements of Electromagnetics", Oxford, 2007.
- [7] K. Preis, O. Biro, G. Buchgraber, "Thermal-Electromagnetic Coupling in the Finite-Element Simulation of Power Transformers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 999-1002, Apr. 2006.
- [8] G. Bertotti, "General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 24, no. 4, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [9] J. H. Harlow, "Electric Power Transformer Engi-

neering", CRC Press, 2007.

- [10] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering(Design and Practice)", Marcel Dekker INC, 2004.
- [11] Cengel, Y. A, "Heat Transfer-A Practical Approach", McGrawHill, 2006.
- [12] 김중경, 오연호, 이지연, 한성진, "열유동을 고려한 GIS 모선의 온도상승 예측", *대한전기학회지*, Vol 58, No.4, pp.742-747, Apr. 2009.
- [13] G. L. Alegi, W. Z. Black, "Real-Time Thermal Model for An Oil-Immersed, Forced-Air Cooled Transformer", *IEEE Tran. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, Apr. 1990.
- [14] S. H. Lee, B. Y. Lee, H. K. Kim, and H. G. Kim, "Local Heat Source Approximation Technique for Predicting Temperature Rise in Power Capacitors", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1250-1253, Mar. 2009.
- [15] C. Ortiz, A.W. Skorek, M. Lavoie, and P. Benard, "Parallel CFD Analysis of Conjugate Heat Transfer in Dry-Type Transformer", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp. 1530-1534, Jul.-Aug. 2009.
- [16] 노오연, "점성유동이론", 박영사, 2007.
- [17] H.-M. Ahn, Y.-H. Oh, S.-C. Hahn, "Experimental Verification of Temperature Rise Prediction for Power Transformer by Coupled Electromagnetic-Thermal-Fluid Analysis", *INTERMAG 2011 Conf.*, Apr. 2011.

저 자 소 개

안 현 모 (安 現 模)

2009년 동아대 공대 전기공학과 졸업(학사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6946

Fax : 051-200-6947

E-mail : hmahn@donga.ac.kr

김 민 수 (金 敏 秀)

1999년 KAIST 재료공학과 졸업(학사). 2001년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사), 2005년 동 대학원 재료공학과 졸업(박사). 2005년~현재 한국전기연구원 재료응용연구본부 선임연구원.

Tel : 055-280-1641

Fax : 055-280-1590

E-mail : minsoo@keri.re.kr

송재성 (宋在成)

1980년 서울대 공대 금속공학과 졸업(학사). 1982년 KAIST 재료공학과 졸업(석사), 1991년 동 대학원 재료공학과 졸업(박사). 1982년~현재 한국전기연구원 재료응용연구본부 책임연구원.

Tel : 055-280-1640

Fax : 055-280-1590

E-mail : jssong@keri.re.kr

한성진 (韓聲鎭)

1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년~현재 동아대 전기공학과 교수.

Tel : 051-200-7737

Fax : 051-200-6947

E-mail : schahn@dau.ac.kr